УДК 524.1-352

# ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ, НАБЛЮДАВШИЕСЯ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ МИССИИ *HELIOS*

© 2022 г. Н. С. Шлык<sup>1, \*</sup>, А. В. Белов<sup>1</sup>, М. А. Абунина<sup>1</sup>, А. А. Абунин<sup>1</sup>, А. Рараіоаппои<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия <sup>2</sup>Институт астрономии, астрофизики, космических технологий и дистанционного зондирования (IAASARS), Национальная обсерватория Афин, г. Пентели, Греция

\*e-mail: nshlyk@izmiran.ru

Поступила в редакцию 21.02.2022 г. После доработки 04.03.2022 г. Принята к публикации 30.03.2022 г.

Выделены и исследованы Форбуш-эффекты на основе данных космических аппаратов *Helios A* и *B*, функционировавших в период с декабря 1974 по февраль 1986 гг. Составлен подробный каталог 1166 Форбуш-эффектов – Helios FD, включающий в себя характеристики космических лучей, солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и вызвавших их межпланетных возмущений. Исследованы количество, амплитуда Форбуш-эффектов, скорость и протонная температура солнечного ветра, величина межпланетного магнитного поля на разных расстояниях от Солнца. Произведено сравнение Форбуш-эффектов, которые были зарегистрированы и космическими аппаратами *Helios*, и сетью нейтронных мониторов на Земле. Установлено, что величина Форбуш-эффектов определяется характеристиками межпланетных возмущений и почти не зависит от радиального расстояния от Солнца.

DOI: 10.31857/S0016794022040149

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-эффекты (ФЭ) открыты более 80 лет назад [Forbush, 1937] и с тех пор активно изучаются. В рамках данной работы под Форбуш-эффектами понимаются изменения плотности и анизотропии космических лучей (КЛ), вызванные крупномасштабными возмущениями солнечного ветра (CB) [Belov et al., 2001; Belov, 2009]. Но стоит отметить, что большая часть сведений о ФЭ собрана практически в одной точке гелиосферы – на Земле, нейтронными мониторами (НМ) или космическими аппаратами (КА) на орбите Земли. А ведь чтобы досконально изучить один  $\Phi \Im$ , нужно понимать, что произошло на Солнце, вызвало крупномасштабное межпланетное возмущение, которое впоследствии спровоцировало возникновение ФЭ. Помочь с решением этой проблемы могут данные различных КА, удаленных от Земли, среди которых как давние миссии (например, Pioneer, Ulysses, Voyageer), так и более новые (Parker Solar Probe, Solar Orbiter). Но для последних аппаратов, например, еще не накоплена достаточная статистика, поэтому миссия Helios попрежнему остается одним из лучших источников информации о межпланетных возмущениях и вариациях КЛ между Солнцем и орбитой Земли.

Миссия *Helios* продолжалась много лет (с конца 1974 до начала 1985 г.), было два аппарата с идентичными детекторами, получен длинный ряд непрерывных данных в разных каналах КЛ (в том числе, достаточно высокоэнергичных) с одновременным измерением параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), охвачены расстояния от 0.28 до 1 а. е.

ФЭ по данным *Helios* уже изучались. К самым ранним работам относятся статьи Müller-Mellin et al. [1977], Кипоw et al. [1977], в которых рассматривается изменение интенсивности потока протонов и ядер гелия в энергетическом диапазоне 20–50 МэВ/част. В работах Cane et al. [1994, 1997] использовались данные о частицах с энергией >60 МэВ/а. е. м. с *Helios A* и *B*, чтобы продемонстрировать тесную связь между выбросами солнечного вещества и краткосрочными понижениями плотности потока КЛ. Richardson et al. [1996] по данным аппаратов *Helios* и *IMP8* исследуют связь между рекуррентными понижениями плотности КЛ и характеристиками рекуррентных потоков CB. В работе Blanco et al. [2013] были по-



**Рис. 1.** Форбуш-эффект 26.03.1976 г., зарегистрированный космическим аппаратом *Helios A*, на расстоянии 0.32 а. е.

лучены радиальные зависимости для скорости CB, величины ММП и амплитуды ФЭ на основе данных о 35 магнитных облаках. Marquardt and Heber [2019], используя данные *Helios* о галактических КЛ (в частности, водорода), описывают существующие радиальные градиенты во внутренней гелиосфере.

Целью настоящей работы является обобщение и сведение имеющихся данных аппаратов миссии *Helios* по КЛ (для канала с энергией >50 МэВ), а также сопутствующих характеристик ММП и СВ, в единую базу данных для создания каталога Форбуш-эффектов, зарегистрированных на расстояниях от 0.28 до 1 а. е. Созданный каталог – Helios FD – полезен для изучения различных радиальных зависимостей характеристик ФЭ, а также изучения эволюции межпланетных возмущений по мере их распространения от Солнца к Земле.

# 2. СОЗДАНИЕ КАТАЛОГА ФЭ ПО ДАННЫМ МИССИИ *HELIOS*

На основе имеющихся данных детекторов *Helios* (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/helios/helios1/, https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/helios/helios2/) по вариациям КЛ (канал с энергией >50 МэВ) и данным ММП и СВ был создан обширный каталог ФЭ, наблюдавшихся на обоих КА *Helios*, включающий в себя сведения о 1166 событиях за весь период функционирования аппаратов *Helios* A и B. При выделении ФЭ мы руководствовались следующими соображениями:

1) использовали списки ударных волн, зарегистрированных на *Helios*, для определения времени начала  $\Phi \Im$ ;

2) в тех случаях, когда межпланетное возмущение не имело ударной волны, начало  $\Phi \Im$  выбиралось по резкому изменению характеристик CB (скорости CB и/или модуля ММП), если данные по ним были доступны;

3) если данные СВ и ММП отсутствовали, то начало ФЭ определялось по резким изменениям потока КЛ.

Таким образом, выделение каждого ФЭ было произведено вручную, исследовались подряд все ряды имеющихся данных. Ограничения по амплитуде и продолжительности ФЭ возникли естественным образом из статистических погрешностей данных КЛ. Выделять ФЭ с величиной <1%, как правило, не удавалось.

На рисунке 1 показано поведение параметров СВ, КЛ и ММП для ФЭ, зарегистрированного аппаратом Helios A 26 марта 1976 г. На верхней панели изображены плотность СВ (кружочки) и температура СВ (крестики), на средней панели – вариации плотности КЛ, на нижней панели – скорость СВ (верхняя кривая), модуль ММП и его компоненты. На круговой диаграмме на средней панели показано взаимное расположение Солнца (кружок в центре), аппаратов Helios (светло-серые кружки) и Земли (темно-серый кружок) в плоскости орбиты Земли с учетом соответствующих долгот. Начало события отмечено серым вытянутым треугольником. Данный ФЭ связан с регистрацией коронального выброса массы: виден рост модуля ММП, скорости и плотности СВ, а также резкое падение плотности КЛ. Итоговая амплитуда  $\Phi \Theta$  составила AF = 14%. Следует отметить, что в этот период *Helios A* находился очень близко к Солнцу, поэтому наблюдаемые значения ММП столь велики: максимальное значения модуля ММП в этом событии составило Bmax = = 72.38 нТл.

На рисунке 2 приведен пример события, зарегистрированного на аппарате *Helios B* 24 апреля 1977 г. Вероятно, этот ФЭ вызван регистрацией высокоскоростного потока из корональной дыры, о чем свидетельствуют длительные повышен-



Рис. 2. Форбуш-эффект 24-26.04.1977 г., зарегистрированный космическим аппаратом Helios B, на расстоянии 0.28 а. е.

ные значения скорости CB, небольшая амплитуда изменения компонент ММП при наличии высокой температуры. *Helios В* также находился близко к Солнцу (0.28 а. е., см. диаграмму на средней панели), поэтому фоновые значения ММП столь велики (~40 нТл). Однако величина ФЭ в этом событии составила всего AF = 3.2%, в отличие от предыдущего примера.

Таким образом, можно утверждать, что детекторы *Helios* по мере своего перемещения часто регистрировали картину, непривычную для тех, кто исследует солнечный ветер по околоземным наблюдениям: помимо очень больших величин плотности, температуры СВ и модуля ММП, в вариациях галактических КЛ нередко прослеживается влияние солнечных КЛ (СКЛ), а также межпланетные возмущения часто объединяются, и трудно определить, где кончается одно и начинается другое.

В этой связи для каждого события был введен коэффициент качества данных – *Q*:

• если имелись значительные пробелы в данных КЛ и/или большие потоки СКЛ, которые не позволяли определить характеристики  $\Phi \Im$ , то событию присваивался Q = 1;

• если в данных КЛ имелись пробелы и/или потоки СКЛ, и характеристики ФЭ определялись крайне ненадежно, то соответствующее событие получало коэффициент Q = 2;

• если в данных КЛ присутствовали пробелы и/или небольшие потоки СКЛ, но их влияние на определяемые характеристики  $\Phi$ Э было незначительно, то Q = 3;

• если в данных КЛ имелись незначительные пробелы (2–3 ч) и/или влияние солнечных КЛ, которые не мешали определению основных параметров ФЭ, но у исследователей оставались некоторые сомнения, то событию присваивался Q = 4;

• если имелся полный ряд данных КЛ без влияния СКЛ, и была уверенность в точном выделении  $\Phi$ Э, то Q = 5.

Всего удалось выделить 1166 событий, из которых надежно выделенных  $\Phi \Im - 763 \ (Q \ge 4)$ .

На рисунке 3 приведено распределение по величине выделенных для *Helios*  $\Phi$ Э с высоким коэффициентом качества данных ( $Q \ge 4$ ).  $\Phi$ Э с величиной до 8% (включительно) составляют 94.3%



**Рис. 3.** Распределение надежно выделенных  $\Phi \Im$  на *Helios* по величине. На рисунке не приведены три  $\Phi \Im$  с самыми большими амплитудами (27.6; 34.1; 34.8%).



Рис. 4. Гистограмма распределения количества ФЭ по расстоянию от Солнца, где 1 – орбита Земли.

от всего количества надежно выделенных  $\Phi$ Э. Только 3.7% (28 событий) всех  $\Phi$ Э имели величину более 10%. Среднее значение амплитуды  $\Phi$ Э для всех событий в данной выборке составило 3.6 ± 0.11%, медианное значение – 2.7%.

## 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЭ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ НА РАЗНЫХ РАССТОЯНИЯХ ОТ СОЛНЦА

Рассмотрим связь количества ФЭ, зарегистрированных на КА *Helios*, с расстоянием от Солнца. Получается очень нестандартная гистограмма (рис. 4). Обычно она имеет вид случайного распределения, а здесь видно, что много ФЭ зарегистрировано у Земли, но и у Солнца тоже. Очевидно, это можно объяснить тем, что траектории космических аппаратов *Helios* — вытянутые эллиптические, и средние расстояния пролетались быстрее, а на концах распределения аппараты задерживались дольше.

Можно также предположить сушествование некоторой зависимости величины ФЭ от расстояния. На рисунке 5 приведена связь амплитуды ФЭ с расстоянием от Солнца для событий с высоким качеством данных ( $Q \ge 4$ ). Сравнение величины зарегистрированных на разных расстояниях ФЭ позволяет предположить, что радиальная зависимость или отсутствует. или очень слабая: коэффициент корреляции составил  $cc = -0.02 \pm$ ± 0.04, а коэффициент регрессии (наклон степенной зависимости)  $\beta = -0.03 \pm 0.06$ . Ромбики с ошибками на рис. 5 относятся к средним значениям для интервалов с равными диапазонами изменения расстояния. Поскольку в рассматриваемой выборке много событий, ошибка средних значений получается малой.

Отметим, что большой разброс точек на рис. 5 свидетельствует о том, что радиальная зависимость величины  $\Phi$ Э, возможно, просто не является определяющей, а есть другие, более существенные зависимости. Надежное выделение радиальной зависимости затруднительно, поскольку при любом моделировании  $\Phi$ Э, в первую очередь, нужно учитывать свойства межпланетных возмущений, которые индуцировали  $\Phi$ Э.

Поскольку явной связи между величиной ФЭ и расстоянием не было установлено, мы рассмотрели другие параметры, в частности, сравнили различия в характеристиках событий, зарегистрированных на малых расстояниях от Солнца и у орбиты Земли.

На рисунке 6 приведены распределения различных параметров для двух групп событий: зарегистрированных около Солнца (на расстояниях 0.28-0.45 а. е.) и около орбиты Земли (на расстояниях 0.9-1 а. е.): амплитуда ФЭ (*AF*, рис. 6*a*), минимальная в событии протонная температура СВ (*T*min, рис. 6*b*), максимальная в событии индукция ММП (*B*max, рис. 6*b*) и максимальная в событии скорость СВ (*V*max, рис. 6*c*).

Анализ рисунка 6a позволяет сделать вывод, что распределения величины  $\Phi \Im$  на разных расстояниях от Солнца очень похожи, а значит, подтверждает описанное выше предположение о том, что амплитуда  $\Phi \Im$  не зависит от расстояния.

Распределения параметра *T*min имеют значительные отличия, что вполне ожидаемо, поскольку температура значительно выше около Солнца, чем у орбиты Земли (рис. 6*б*).

Гистограмма распределения *B*max также имеет значительные отличия для разных расстояний (рис. *6в*). Те величины полей, которые наблюдаются у Земли, практически отсутствуют у Солнца,



**Рис. 5.** Связь амплитуды  $\Phi \Im$  с расстоянием от Солнца (для событий с  $Q \ge 4$ ).

и являются минимальными в сравнении с теми, что характерны малым расстояниям от Солнца.

Что касается распределений максимальной скорости CB (Vmax), можно утверждать, что они похожи, но различия также присутствуют (рис. 6г). Например, первый столбик гистограммы – минимальные скорости от 200 до 300 км/с – имеется только у Солнца. Видимо, сюда попали очень медленные события, которые подхватываются спокойным СВ и к моменту достижения орбиты Земли увеличивают свою скорость до значений ~400 км/с. Скорости от 450 до 600 км/с чаще регистрируются у Земли, чем у Солнца. А если рассматривать самые большие скорости, видно, что они чаще наблюдаются у Солнца, чем у Земли. Очевидно, это связано с торможением по мере распространения из-за взаимодействия с более низкоскоростным потоком спокойного СВ. В этой связи можно предположить, что маленькие скорости увеличиваются с расстоянием, а большие уменьшаются. Подобные выводы были также получены, например, в работе [Gopalswamy et al., 2000]. Однако, описанные процессы торможения/ускорения в большом массиве данных, видимо, компенсируют друг друга, поэтому для всех событий явной радиальной зависимости для скорости установить не удается.

В таблице 1 приведены средние значения перечисленных выше параметров для трех групп событий, разделенных в зависимости от положения аппарата *Helios* и расстояния от Солнца, на котором был зарегистрирован соответствующий ФЭ. Сравнение их позволяет сделать вывод о том, что самые большие отличия имеют параметры *B*тах и *T*min, которые значительно убывают по мере удаления от Солнца (в 3.3 и 2.4 раза соответственно), а вот средние значения амплитуды ФЭ и максимальной скорости СВ остаются практически неизменными с учетом статистической ошибки на любых расстояниях от Солнца.

### 4. СРАВНЕНИЕ С ЗЕМНЫМИ ДАННЫМИ

В ИЗМИРАН имеется также база данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (Forbush decreases and interplanetary disturbanses – FEID), которая содержит сведения о зарегистрированных наземными НМ событиях, для частиц с

Таблица 1. Средние значения некоторых параметров солнечного ветра и космических лучей для ФЭ, зарегистрированных КА *Helios* на разных расстояниях от Солнца

Параметр/группа ФЭ по расстоянию от Солнца	0.28–0.45 a. e.	0.46–0.89 a. e.	0.9–1 a. e.
AF, %	$3.7 \pm 0.3$	$3.6\pm0.15$	$3.5 \pm 0.19$
$T$ min, $\times 10^3$ K	$89 \pm 5.5$	$49 \pm 2.3$	$37 \pm 2.3$
<i>В</i> тах, нТл	$39.6 \pm 1.1$	$18.1\pm0.5$	$12.1\pm0.4$
Vmax, км/c	507 ± 13	493 ± 7	516 ± 8



**Рис. 6.** Гистограммы распределения различных параметров для событий, зарегистрированных около Солнца (0.28–0.45 а. е., светло-серые столбики) и около орбиты Земли (0.9–1 а. е., темно-серые столбики).

жесткостью 10 ГВ, полученных методом глобальной съемки [Белов и др., 2018]. Часть событий, зарегистрированных на *Helios* (в случае подходящего расположения аппаратов) удалось ассоциировать с земными ФЭ, поскольку они были обусловлены одними и теми же межпланетными возмущениями. Это позволяет более точно описать источник межпланетного возмущения, а также дает хорошую возможность для изучения изменения характеристик этого возмущения по мере распространения от Солнца к Земле.

Естественно ожидать, что величины таких ФЭ коррелируют между собой и различия между ними будут определяться разницей в энергетических характеристиках детекторов и, возможно, разницей расстояний от Солнца. Таким образом, связь этих величин можно представить как:

$$AF = c(AF_E)^{\alpha} r^{\mathrm{p}},\tag{1}$$

где AF – величина ФЭ, зарегистрированного на *Helios*;  $AF_E$  – величина аналогичного ФЭ у Земли (в FEID); r – расстояние от Солнца.

Кроме величин, вошедших в формулу, следует также учесть разницу долгот точек наблюдения:

чем больше она будет, тем вероятнее будут большие различия AF и  $AF_E$ . Чтобы минимизировать долготные различия, для этого исследования были использованы только те ФЭ, которые наблюдались в достаточно узком диапазоне — с различием по долготе не более 25°.

На рисунке 7 приведена зависимость величины ФЭ для 60 событий, зарегистрированных и на аппаратах *Helios*, и на Земле сетью НМ. Моделирование по формуле (1) дает коэффициент корреляции  $cc = 0.72 \pm 0.09$  и следующие коэффициенты:  $c = 0.45 \pm 0.035$ ;  $\alpha = 0.79 \pm 0.1$ ;  $\beta = 0.11 \pm 0.22$ .

Видно, что величины  $\Phi$ Э, зарегистрированных в разных точках и на разных детекторах (с отличающимися энергетическими зависимостями), но обусловленные одними и теми же межпланетными возмущениями, хорошо коррелируют между собой. В данном случае мы получили положительную радиальную зависимость величины  $\Phi$ Э, но этот результат никоим образом не противоречит описанному выше отсутствию радиальной зависимости для величины  $\Phi$ Э, т.к.  $\beta = 0$  в пределах одной статистической погрешности.



**Рис.** 7. Соотношение величины  $\Phi$ Э для событий (с разницей долгот <25°), зарегистрированных и на аппаратах *Helios*, и сетью HM на Земле.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нам удалось создать базу ФЭ и межпланетных возмущений, зарегистрированных в миссии Неlios. Конечно, следует уточнить, что полнота этой базы относительна и требует объяснений, поскольку она включает события только по одному каналу детекторов *Helios* (с энергией >50 МэВ). Кроме того, необходимо подчеркнуть, что рассматривались ФЭ именно в галактических КЛ. Детекторы *Helios* регистрировали  $\Phi \Theta$  и во время событий, связанных с ускорением солнечных высокоэнергичных частиц, но такие  $\Phi \exists$  трудно выделять и еще труднее исследовать и обобщать, потому что они выделяются на фоне изменяющихся фоновых КЛ, в данном случае солнечных. Даже если это удастся сделать, то полученная база данных не будет однородной, а нам с самого начала хотелось получить однородный ряд данных, который можно будет сравнивать, в первую очередь, с ФЭ, наблюдавшимися у Земли.

Итак,

1. По данным космических аппаратов миссии *Helios* с декабря 1974 по август 1985 г. создана база данных и каталог Helios FD, содержащие информацию о поведении потока галактических КЛ, а также характеристиках соответствующих им межпланетных возмущений солнечного ветра.

2. В энергетическом канале >50 МэВ выделено всего 1166 ФЭ, из которых с хорошим качеством данных – 763 Форбуш-эффекта.

3. Показано, что зависимость величины  $\Phi \Im$  от расстояния или отсутствует, или очень слабая, и величина Форбуш-эффекта определяется не расстоянием от Солнца, а связана с изменением характеристик межпланетных возмущений по мере их распространения в гелиосфере.

4. Описано изменение характеристик CB и ММП на разных расстояниях от Солнца: средняя максимальная индукция магнитного поля в межпланетных возмущениях существенно больше на расстояниях 0.28–0.45 а. е., чем у орбиты Земли; минимальная протонная температура значительно меньше вблизи орбиты Земли, а средняя максимальная скорость СВ практически не меняется с удалением от Солнца.

Мы надеемся в будущем разделить события по типам солнечных источников (выделить группы ФЭ, вызванных корональными выбросами массы, высокоскоростными потоками из корональных дыр, а также смешанные события), и проверить существование различных радиальных зависимостей отдельно для каждой группы. Есть основания предполагать. что эти зависимости будут различными, в силу различий в процессах образования, развития и изменения этих межпланетных возмущений по мере распространения от Солнца. Сейчас эта задача пока не выполнена изза ее трудоемкости: для каждого выделенного события требуется детальный комплексный анализ ситуации в отсутствие данных о событиях на Солние.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А. и Абунин А.А. поддержаны грантом Российского научного фонда № 20-72-10023.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018. https://doi.org/10.7868/S0016794018030082

- *Belov A.V.* Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symposium. V. 257. P. 439–450. https://doi.org/10.1017/S1743921309029676. 2009.

- Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Struminsky A.B., Yanke V.G. What determines the magnitude of Forbush decreases? // Adv. Space Res. V. 27. P. 625–630. 2001. https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00095-3

- Blanco J., Hidalgo M., Gómez-Herrero R., Rodríguez-Pacheco J., Heber B., Wimmer-Schweingruber R., Martín C. Energetic-particle-flux decreases related to magnetic cloud passages as observed by the Helios 1 and 2 spacecraft // Astron. Astrophys. V. 556. A146. 2013. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321739

- Cane H., Richardson I., von Rosenvinge T., Wibberenz G. Cosmic ray decreases and shock structure: A multispacecraft study // J. Geophys. Res. V. 99. № A11. P. 21429– 21442. 1994.

https://doi.org/10.1029/94JA01529

 Cane H., Richardson I., Wibberenz G. Helios 1 and 2 observations of particle decreases, ejecta, and magnetic clouds // J. Geophys. Res. V. 102. № A4. P. 7075–7086. 1997. https://doi.org/10.1029/97JA00149 - Forbush S.E. On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm // Phys. Rev. V. 51. P. 1108-1109. 1937. https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.1108.3

- Gopalswamy N., Lara A., Lepping R.P., Kaiser M.L., Berdichevsky D., St. Cvr O.C. Interplanetary acceleration of coronal mass ejections // Geophys. Res. Lett. V. 27. № 2. P. 145-148. DOI: 0094-8276/00/1999GL003639505.00. 2000.

- Kunow H., Witte M., Wibberenz G., Hempe H., Müller-Mellin R., Green G., Iwers B., Fuckner J. Cosmic ray measurements on board Helios 1 from December 1974 to September 1975: quiet time spectra, radial gradients, and solar events // J. Geophys. V. 42. P. 615-631. 1977.

- Marquardt J., Heber B. Galactic cosmic ray hydrogen spectra and radial gradients in the inner heliosphere measured by the HELIOS Experiment 6 // Astron. Astrophys. V. 625. A153. 2019.

https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935413

– Müller-Mellin R., Witte M., Hempe H., Kunow H., Wibberenz G., Green G. Cosmic ray radial gradients: Helios 1 results between 1.0 and 0.3 AU / Proc. 15th ICRC, Bulgaria, Plovdiv. V. 11. P. 214-218. 1977.

- Richardson L. Wibberenz G., Cane H. The relationship between recurring cosmic ray depressions and corotating solar wind streams at ≤1 AU: IMP 8 and Helios 1 and 2 anticoincidence guard rate observations // J. Geophys. Res. V.101. P. 13483-13496. 1996.

https://doi.org/10.1029/96JA00547